第45卷 第6期
2022年11月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 45 No. 6
Nov. 2022

喜马拉雅地区叶如藏布流域冰川和冰湖变化遥感监测研究

丁悦凯, 刘 睿, 张翠兰, 童丽媛, 董 军

（GIS应用研究重庆市高校重点实验室/重庆师范大学地理与旅游学院，重庆 401331）

摘 要：叶如藏布流域冰川和冰湖众多，冰川融水是当地重要的淡水资源，是冰湖扩张的重要补给，冰湖溃决是当地潜在的自然灾害，因此分析该区域冰川和冰湖的现状与变化特征具有重要的现实意义。基于Landsat系列遥感影像，分析1990—2020年叶如藏布流域冰川和冰湖的分布与变化特征。结果表明：(1) 近30 a来叶如藏布流域冰川面积整体呈退缩趋势，由1990年167.80 km^2退缩到2020年128.92 km^2，共退缩38.88 km^2，年均退缩率为0.77%·a^{-1}，且研究区冰川主要分布在海拔5800~6400 m之间，集中分布在5°~20°的坡度上。(2) 与冰川变化趋势相反，研究时段冰湖整体表现为扩张趋势，由1990年5.72 km^2增加到2020年8.81 km^2，30 a共增加3.09 km^2，年均增长率为1.80%·a^{-1}。(3) 冰湖主要分布在海拔5000~5600 m范围内，坡度在0~10°分布面积较多，表碛覆盖型冰川与非表碛覆盖型冰川对冰湖有着不同程度的影响。(4) 1990—2017年叶如藏布流域温度与降水波动较大，温度整体呈上升趋势，降水量则波动下降，导致叶如藏布流域的冰川消融，冰湖扩张。通过上述研究以期为叶如藏布流域地区提供详细的冰川和冰湖面积分布与变化特征基础数据，为防灾减灾提供一定的支撑。

关 键 词：冰川；冰湖；遥感监测；叶如藏布流域

文章编号：1000-6060(2022)06-1870-11(1870~1880)

冰川被称作气候系统中的指示器，在全球气候变化等方面具有重要意义[1]。近年来全球气温普遍呈升高趋势，据统计，2001—2020年全球平均温度升高了1.09 ℃[2]。受气候变化影响，冰川呈持续退缩状态，前人研究表明青藏高原及周边区域冰川冰储量在21世纪末减少为当前水平的64%[3]。气温普遍升高，导致冰川加速消融。冰川融水作为干旱区重要淡水来源，对当地生态环境及经济发展等方面有着重要意义[4-7]，尽管冰川融水在短时间内可以缓解水资源短缺带来的影响，但也存在潜在危害，部分冰川贮存了历史时期的污染物，冰川消融使得污染物进入水环境，从而影响人类健康[8-9]。而冰湖作为重要的补给源，在调节河川径流、保护生态多样性、旅游观赏等方面也具有重要作用[10]。因此，通过研究冰川和冰湖的时空变化与分布特征，对掌握区域水资源与生态状况，分析冰川和冰湖在气候变化下的响应特征，对区域生态治理、水资源管理与灾害防治等方面具有重要的科学与现实意义[11-13]。

喜马拉雅地区冰川分布面积较大[14-15]，同时也是冰湖溃决的重灾区，据统计，该地区发生过多起冰湖溃决事件，对人民的安全与财产造成了巨大威胁[16-18]，然而喜马拉雅地区海拔高、地势陡峭，极大地限制了开展冰川和冰湖的实地考察[19-21]。遥感技术因其具有大范围同步观测和时效性的优势，成为了冰川及冰湖监测的主要手段，例如冀琴[22]利用Landsat卫星数据对整个喜马拉雅山冰川进行了长时序的监测研究，结果表明1990—2015年喜马拉雅

收稿日期：2022-03-20； **修订日期**：2022-06-13
基金项目：国家自然科学基金项目(41907396,41801063,42071277)；重庆市教育委员会人文社会科学研究项目(22SKSZ030)；重庆师范大学基金项目(22XLB003,22XLB002)；重庆师范大学第五届"三春湖"杯创新创业竞赛课外学术科技作品项目(202201043)资助
作者简介：丁悦凯(2001-)，男，本科生，主要从事遥感应用等方面的研究. E-mail: ykice011@163.com
通讯作者：董军(1991-)，男，硕士，助教，主要从事微波遥感方面研究. E-mail: 1442708713@qq.com

山地区冰川退缩迅速，冰川面积共减少2553.10 km²；宫鹏等[10]对科西河流域的冰湖监测，发现1960—2010年该流域冰湖数量增加50个，面积扩张29.34 km²。叶如藏布流域地处喜马拉雅山中段北坡，是朋曲(境外称孙科西河)的最大支流，流域内的冰湖是该流域诸多河流的源头。安丽娜[23]曾对该流域的夏季地表水化学与氢氧同位素特征进行研究调查。现阶段对该流域冰川和冰湖的研究较少，基于此，本研究以叶如藏布流域的冰川和冰湖为研究对象，结合Landsat系列卫星数据，分析近30 a来叶如藏布流域冰川和冰湖的变化，同时结合气象数据，探究冰川与冰湖变化的影响因素。

1　研究区概况

叶如藏布流域(27°50′~28°10′N，87°50′~88°09′E)地处喜马拉雅山中段北坡[23]，流域面积1627 km²(图1)。研究区由北向南地势缓慢抬升，海拔位于4122~7440 m之间。2017年，流域年均气温1.38 ℃，降水量为1788.45 mm，研究区地势高、气温低，受高原山地气候影响，降水多发生在夏季。根据中国第二次冰川编目[24]，2006年叶如藏布流域冰川数目达132条，面积为139.39 km²，且多分布于流域南部和西部。

2　数据与方法

2.1　数据来源

本研究采用Landsat系列影像，于美国地质勘探局(https://earthexplorer.usgs.gov/)及地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)下载，为了准确提取冰川和冰湖的边界，在一定程度上消除积雪、云层等因素对研究结果精度的影响，最终选用16景云量较少的影像数据(表1)。同时采用了ASTER GDEM作为数字高程模型(Digital elevation model，DEM)，该数据下载于地理空间数据云。

研究区冰川和冰湖多分布在高海拔地区，气象站点少，综合各类气象数据来源，最终选择美国特拉华大学(http://climate.geog.udel.edu/~climate/)提供的1990—2017年喜马拉雅山地区平均气温和降水量数据，该数据空间分辨率为0.5°，被广泛用于喜马拉雅地区的冰川研究[25-26]。

2.2　研究方法

前人使用比值阈值法、雪盖指数法或卷积神经网络等方法对冰川边界进行识别[27]，以上方法在冰川边界提取中发挥了重要作用，但相比而言，目视解译法的精度最高。因此，本研究采用目视解译法提取冰川和冰湖的边界信息。此外，利用DEM判断

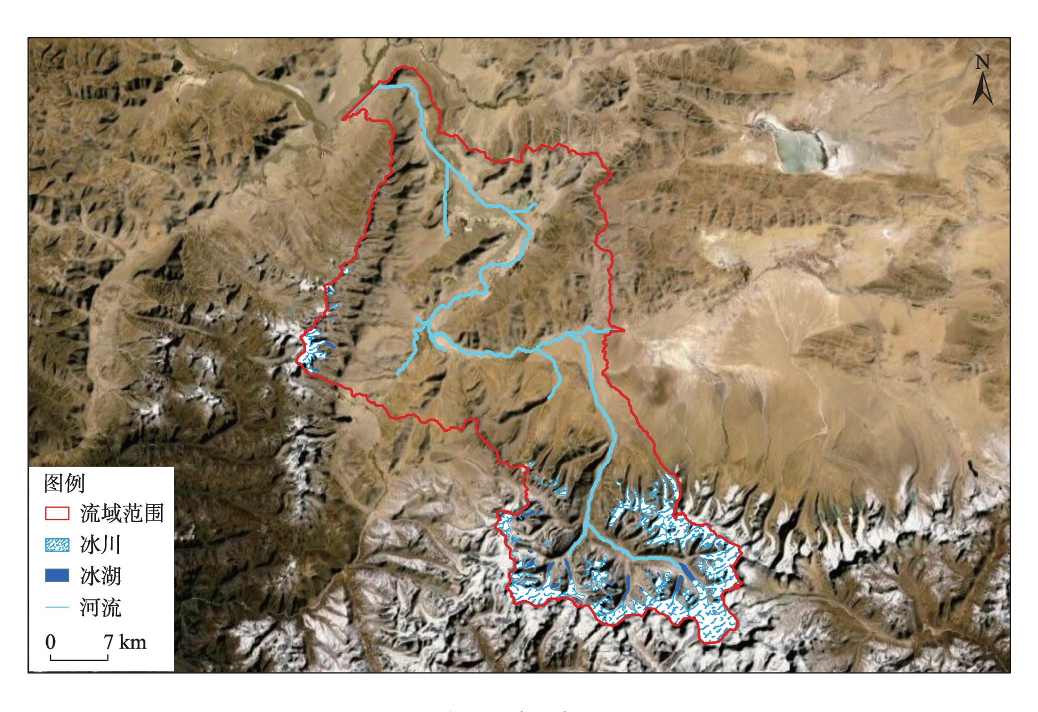


图1　研究区概况

Fig. 1　Location of the study area

表1 叶如藏布流域冰川和冰湖解译影像

Tab. 1 Interpretation images of glaciers and glacial lakes in Yairu Zangbo Basin

获取时间(年-月-日)	传感器	行列号	分辨率/m	云量/%
1990-04-11*	TM	139/41	30	29.0
1990-06-14	TM	139/41	30	42.0
1990-10-20*	TM	139/41	30	31.3
1990-12-23*	TM	139/41	30	17.5
2000-06-17*	ETM+	139/41	30	41.7
2000-09-13*	TM	139/41	30	32.8
2000-10-15*	TM	139/41	30	14.0
2000-12-06	ETM+	139/41	30	0.7
2010-06-13*	ETM+	139/41	30	58.2
2010-07-15*	ETM+	139/41	30	75.6
2010-10-03*	ETM+	139/41	30	39.7
2010-12-06	ETM+	139/41	30	36.8
2020-05-31*	OLI	139/41	30	78.3
2020-06-16*	OLI	139/41	30	28.1
2020-10-22	OLI	139/41	30	10.6
2020-11-23*	OLI	139/41	30	9.3

注:*为参考影像。

是否存在阴影,同时结合冰湖、溪流的位置,识别冰川边界,并将多期历史遥感影像进行对比,排除冰雪对冰川边界提取的影响,最后利用Google Earth进行辅助判断[25]。

为验证研究结果的精确性,本研究采用缓冲区法计算冰川和冰湖面积的提取精度[16,26]。结果表明,误差结果可以满足研究要求(表2)。

表2 叶如藏布流域冰川和冰湖边界缓冲区面积及误差率

Tab. 2 Area and error rate of glacier and glacial lake boundary buffer zone in Yairu Zangbo Basin

类别	年份	缓冲区面积/km²	面积/km²	误差率/%
冰川	1990	174.05	167.80	3.72
冰川	2000	160.54	153.89	4.32
冰川	2010	152.01	145.66	4.36
冰川	2020	135.26	128.92	4.92
冰湖	1990	5.92	5.72	3.55
冰湖	2000	6.98	6.68	4.49
冰湖	2010	6.32	6.05	4.46
冰湖	2020	9.13	8.81	3.63

3 结果与分析

3.1 冰川面积分布及变化

3.1.1 冰川面积变化 由表3可知,近30 a叶如藏布流域冰川退缩趋势明显,4个时期冰川的分布面积分别为167.80 km²、153.89 km²、145.66 km²和128.92 km²,不同时段冰川退缩速率有所差别。1990—2000年面积共减少13.91 km²,年均退缩率为0.83%·a⁻¹;2000—2010年年均退缩率为0.54%·a⁻¹,小于前1个时段;在2010—2020年期间,冰川面积

表3 1990—2020年叶如藏布流域冰川面积分布及变化

Tab. 3 Glacial area distribution and changes in Yairu Zangbo Basin from 1990 to 2020

年份	面积/km²	退缩量/km²	面积变化率/%	年均退缩率/%·a⁻¹
1990	167.80	-	-	-
2000	153.89	13.91	8.29	0.83
2010	145.66	8.24	5.35	0.54
2020	128.92	16.74	11.49	1.14
总计	-	38.88	23.17	0.77

注:-表示无数据。下同。

退缩明显，年均退缩率(1.15%·a⁻¹)远高于前2个时段。综上所述，近30 a叶如藏布流域冰川退缩速率呈现先降低后升高趋势，而在近10 a来，加速退缩趋势最为显著(图2)。

3.1.2　不同海拔冰川面积分布及变化　结合DEM数据，以200 m为间隔，分析不同时段、不同海拔冰川分布特征(图3a)。已有研究表明，冰川面积变化与高程呈现正态分布关系[28]，研究区冰川分布特征与上述规律类似，以2020年冰川为例，海拔5800~6400 m内冰川面积较大，约占总面积的63%。

由图3b可得，随着海拔升高，冰川退缩量逐渐增大，在海拔5800~6000 m处，退缩量最大，为8.85 km^2，之后随着海拔升高冰川退缩量逐渐减少，而在6800 m以上，冰川退缩不明显；尽管研究区冰川退缩量在海拔5800~6000 m处达到最大，但退缩率在5000~5200 m处最高，为64.25%，随着海拔增高，冰川退缩率逐渐下降。

3.1.3　不同坡度冰川面积分布及变化　基于DEM数据，通过提取叶如藏布流域内冰川的坡度信息对其分布特征进行分析。以5°为间隔，分析坡度对冰

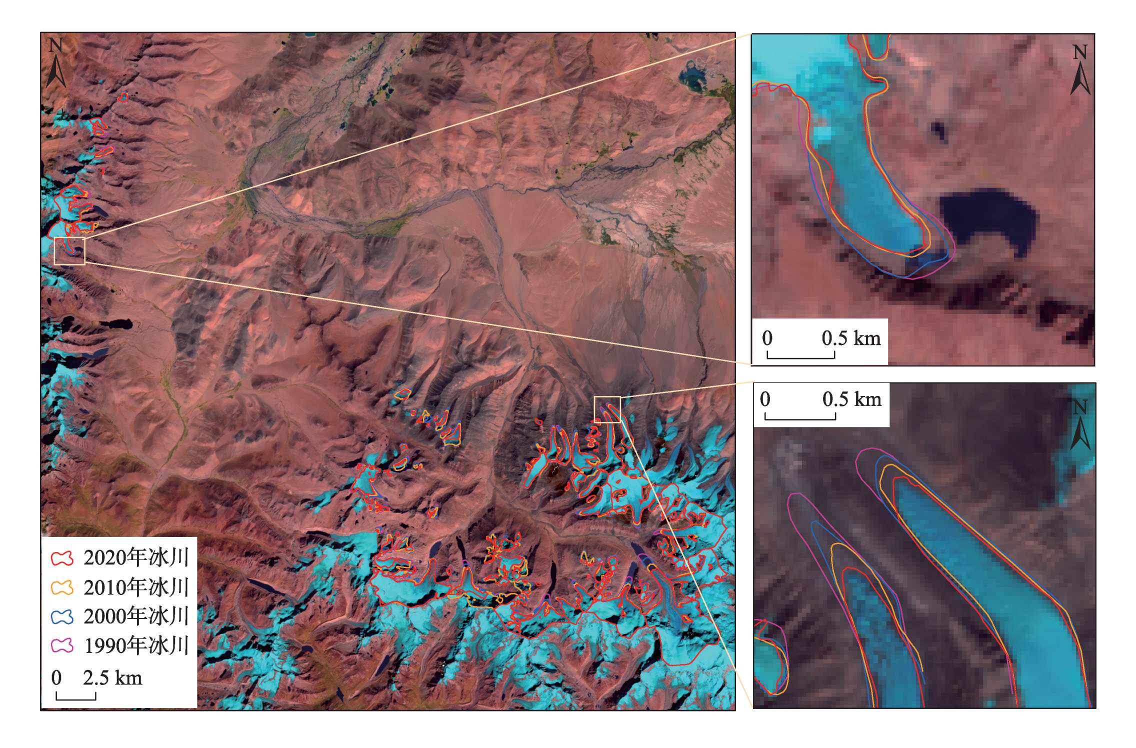


图2　30 a叶如藏布流域冰川面积变化

Fig. 2　Glacier area changes in Yairu Zangbo Basin of 30 years

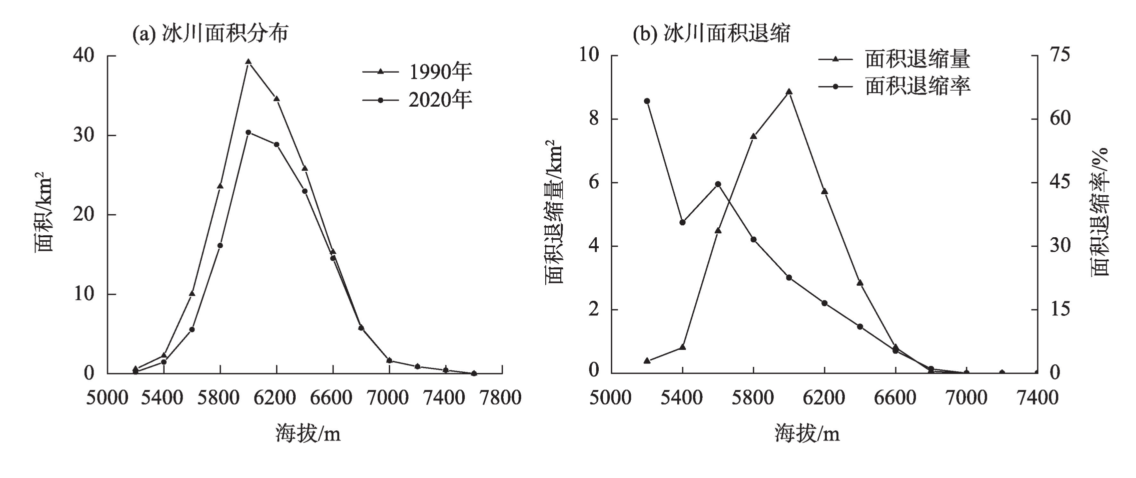


图3　1990—2020年叶如藏布流域不同海拔冰川面积分布及变化

Fig. 3　Distribution and changes of glacier area at different altitudes in Yairu Zangbo Basin from 1990 to 2020

川分布的影响。由图4可知，1990年冰川面积主要分布在5°~20°坡度范围内，约占1990年冰川总面积的46.02%，其中，冰川面积主要分布于10°~15°坡度间，共26.18 km²，占总面积的15.60%。随着坡度增加，冰川分布面积逐渐减少，退缩率逐渐增大，在55°~60°间，冰川分布面积最少，仅为1.55 km²，退缩率在55°~60°最大，为32.77%，在0~5°间，退缩率最小，仅为14.05%。

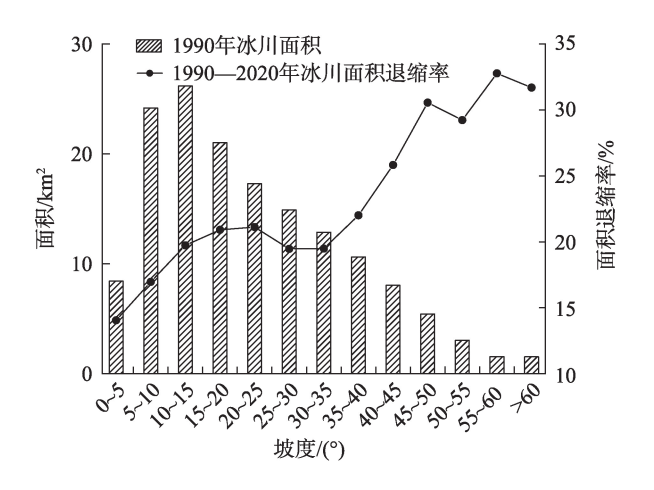


图4 1990—2020年叶如藏布流域不同坡度冰川面积分布及变化

Fig. 4 Distribution and changes of glacier area at different slopes in Yairu Zangbo Basin from 1990 to 2020

3.1.4 表碛覆盖型与非表碛覆盖型冰川面积分布及变化 表碛是指冰川表面的冰碛物，其厚度与冰川消融速率有着直接关系[29]，为了更全面了解研究区冰川分布与变化特征，本研究将叶如藏布流域的冰川分为表碛覆盖型和非表碛覆盖型冰川，并统计1990—2020年不同类型的冰川面积、数目以及平均规模等特点。

由表4可知，表碛覆盖型冰川面积退缩4.89 km²，退缩率为10.82%，非表碛覆盖型冰川面积退缩了33.99 km²，退缩率为27.72%。由上述分析可得，表碛覆盖型冰川数目较少，但平均规模较大，退缩速率较慢；非碛覆盖型冰川数目较多，平均规模较小，退缩速率较快。

表4 1990—2020年叶如藏布流域表碛覆盖型与非表碛覆盖型冰川面积变化

Tab. 4 Area changes of the debris-free and debris-covered glaciers in Yairu Zangbo Basin from 1990 to 2020

年份	表碛覆盖型			非表碛覆盖型		
	面积/km²	数目	平均规模/km²	面积/km²	数目	平均规模/km²
1990	45.19	4	11.30	122.61	106	1.16
2020	40.30	4	10.07	88.62	126	0.70

3.1.5 不同规模冰川面积及数目 为统计不同规模冰川面积分布和变化特征，将叶如藏布流域的冰川面积按大小分为8个等级，探究其分布与变化特征，以期进行更为全面的研究。

由表5可以看出，研究时段冰川数目整体呈上升趋势，共增加20条，其中冰川规模≤0.2 km²的冰川数目增加最多，共计增加39条；规模为0.2~0.5 km²的冰川数目减少最多，共计减少8条；规模为10~20 km²和20~50 km²的冰川数目未发生改变。

从面积分布情况看，规模5~10 km²的冰川面积分布最大，1990年和2020年分别为51.17 km²和33.78 km²，占总面积的30.49%和26.20%；其次是规模10~20 km²的冰川面积分别为23.32 km²和21.78 km²，占比13.90%和16.89%；面积占比最小的是规模0.5~1 km²，冰川面积分别为8.67 km²和4.61 km²。

近30 a来，规模≤0.2 km²的冰川面积呈增加趋势，其余各级的冰川面积均表现为减少状态，其中规模0.5~1 km²的冰川面积退缩最为显著，规模20~50 km²的冰川面积退缩最少。可见，冰川规模越小，数目越多，波动越大；冰川规模越大，数目越少，波动越小。

表5 1990—2020年叶如藏布流域不同规模冰川面积及数目统计

Tab. 5 Area and number of glaciers at different sizes in Yairu Zangbo Basin from 1990 to 2020

规模/km²	1990年		2020年	
	数目/条	面积/km²	数目/条	面积/km²
≤0.2	37	4.18	76	5.21
0.2~0.5	32	10.83	24	6.90
0.5~1	12	8.67	6	4.61
1~2	10	15.41	9	13.44
2~5	10	31.23	8	21.43
5~10	6	51.17	4	33.78
10~20	2	23.32	2	21.78
20~50	1	23.19	1	21.77
总计	110	167.80	130	128.92

3.2 冰湖面积分布及变化

3.2.1 冰湖面积变化 研究时段叶如藏布流域冰湖整体呈扩张趋势(表6)。1990年冰湖面积最小，仅为5.72 km²；2000年冰湖面积为6.68 km²，共增长

表6　1990—2020年叶如藏布流域冰湖面积分布及变化

Tab. 6　Glacial lake area distribution and changes in Yairu Zangbo Basin from 1990 to 2020

年份	面积/km²	变化量/km²	面积变化率/%	年均面积变化率/%·a⁻¹
1990	5.72	–	–	–
2000	6.68	0.96	16.78	1.68
2010	6.05	0.63	9.43	−0.94
2020	8.81	2.76	45.62	4.56
总计	–	3.09	54.02	1.80

0.96 km^2，年均面积变化率为1.68%·a^{-1}；2000—2010年冰湖面积减小0.63 km^2，年均面积变化率为0.94%·a^{-1}；2010—2020年冰湖面积出现上涨趋势，增加2.76 km^2，年均面积变化率为4.56%·a^{-1}，该时期冰湖年均面积变化率最快，2020年冰湖面积达到最大，为8.81 km^2。可见，研究区冰湖面积呈现先增大，后减小，再增大趋势。

3.2.2　不同海拔冰湖面积分布及变化　叶如藏布流域冰湖主要分布在海拔4800~6600 m之间（图5）。冰湖面积与海拔的关系与冰川类似，总体呈正态分布。1990年冰湖面积在5000~5600 m区间内分布最大，为4.51 km^2，占总面积的78.84%；其中5400~5600 m冰湖面积达1.72 km^2，占总面积的30.10%；近30 a内研究区冰湖面积扩张趋势受到海拔影响（表7），通过统计研究区冰湖的年均面积变化率可以发现，随着海拔升高，冰湖面积快速增加，其中6000~6200 m范围内，增加最快，年均变化率可达21.15%，且对应区间的冰川面积分布最大。

3.2.3　不同坡度冰湖面积分布及变化　冰湖面积分布受海拔影响较大，多分布在凹槽或低洼处[30]。如

表7　1990—2020年叶如藏布流域不同海拔冰湖面积变化率

Tab. 7　Changes rate of glacial lakes area at different altitudes in Yairu Zangbo Basin from 1990 to 2020

海拔/m	年均面积变化率/%·a⁻¹		
	1990—2000年	2000—2010年	2010—2020年
4800~5000	4.76	0.00	98.20
5000~5200	−11.87	−7.89	−33.65
5200~5400	−5.12	0.68	−78.11
5400~5600	−35.21	−8.41	−194.57
5600~5800	−18.34	58.98	11.26
5800~6000	−9.39	83.83	21.52
6000~6200	22.66	97.98	15.40
6200~6400	66.67	100.00	–
6400~6600	–	–	–

图6所示，本研究对叶如藏布流域不同坡度冰湖面积分布情况进行分析研究，冰湖面积主要分布在0~10°之间，1990年0~10°坡度内冰湖面积为3.29 km^2，占总面积的57.50%，随着坡度升高，地势变陡，不利于冰湖发育，冰湖面积迅速下降，>60°坡度的冰湖面积仅占0.023 km^2。

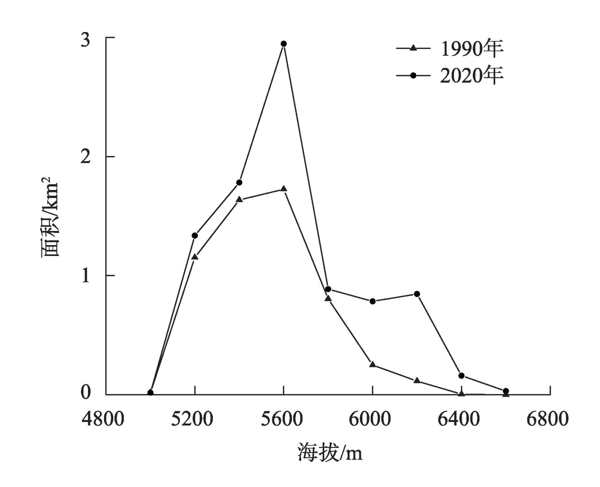


图5　1990—2020年叶如藏布流域不同海拔冰湖面积分布

Fig. 5　Distribution of glacial lakes area at different altitudes in Yairu Zangbo Basin from 1990 to 2020

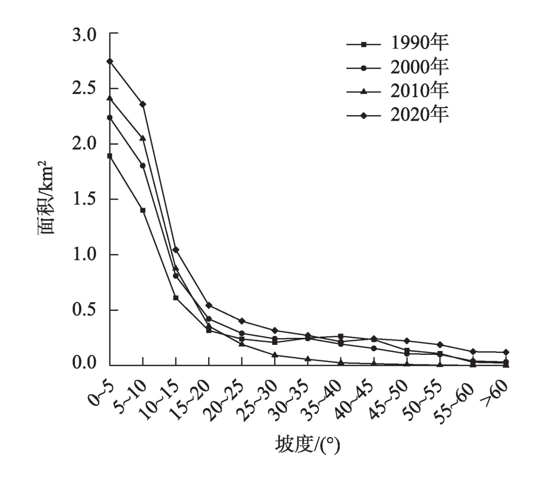


图6　1990—2020年叶如藏布流域不同坡度冰湖面积分布

Fig. 6　Distribution of glacial lakes area at different slopes in Yairu Zangbo Basin from 1990 to 2020

3.2.4 不同类型的冰湖面积分布及变化 表碛对冰川的消融产生抑制作用，导致其消融速率变慢，间接影响了表碛覆盖型冰川周围的冰湖扩张，通过对叶如藏布流域冰湖与冰川的距离进行统计，将冰湖分为受表碛覆盖型冰川影响的冰湖和受非表碛覆盖型冰川影响的冰湖，并计算它们的面积、数目以及平均规模。

由表8可知，1990—2020年受表碛覆盖型冰川影响的冰湖面积增加1.03 km^2，增长率为34.80%，冰湖数目不变，平均规模增加0.20 km^2，增长率为33.90%；而受非表碛覆盖型冰川影响的冰湖面积增加2.06 km^2，增长率为74.64%，冰湖数目增加16个，增长率为88.89%，平均规模减小0.01 km^2，减小率为6.67%。由此可知，受表碛覆盖型冰川影响的冰湖面积变化慢，数目较少，平均规模较大；受非表碛覆盖型冰川影响的冰湖面积变化快，数目较多，平均规模较小。

4 讨论

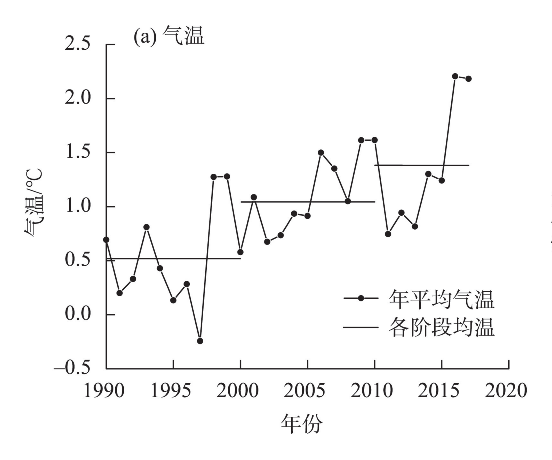
4.1 冰川和冰湖对气候变化的响应

冰川变化受地形、降水、气温、朝向等影响，但主要影响因子是气温和降水，气温影响冰川的消融，降水影响冰川的积累[31]。为研究叶如藏布流域冰川变化和气候的关系，本文分析1990—2017年的气温和降水量变化。可以发现：研究时段内叶如藏布流域的气温整体呈现波动上升（图7a），近30 a上升了1.49 ℃，增温率为0.06 ℃·a^{-1}，平均气温变化幅度为2.45 ℃。自1990年气温呈现下降趋势，1991年后开始逐步回升，1993年气温上涨到0.81 ℃，随后又开始波动下降，1997年到达最低值，仅为−0.24 ℃，之后气温又大幅上涨，一年内的涨幅为1.51 ℃。1999年到达1990年以来的最大值，气温为1.28 ℃。随后开始回落，2000年后气温呈现波动上升趋势，2010年气温达最大值，为1.62 ℃。2010—2011年气温下降0.87 ℃，2011—2017年气温整体呈现波动上升趋势，其中2016年达到研究时段内的最大值，为2.18 ℃。以10 a为一个时间段分析，1990—2000年气温波动变化较大，总体呈现上升趋势，变化率为−0.01 ℃·a^{-1}；2000—2010年气温呈现波动上升，变化率为0.05 ℃·a^{-1}；2010—2017年气温依旧呈上升趋势，增长幅度大于2000—2010年，变化率为0.08 ℃·a^{-1}。结合1990—2017年的气温平均变化趋

表8 1990—2020年叶如藏布流域不同类型的冰湖面积分布及变化

Tab. 8 Distribution and changes of glacial lakes area in different morphological patterms of Yairu Zangbo Basin from 1990 to 2020

年份	受表碛覆盖型冰川影响的冰湖			受非表碛覆盖型冰川影响的冰湖		
	面积/km^2	数目	平均规模/km^2	面积/km^2	数目	平均规模/km^2
1990	2.96	5	0.59	2.76	18	0.15
2020	3.99	5	0.79	4.82	34	0.14



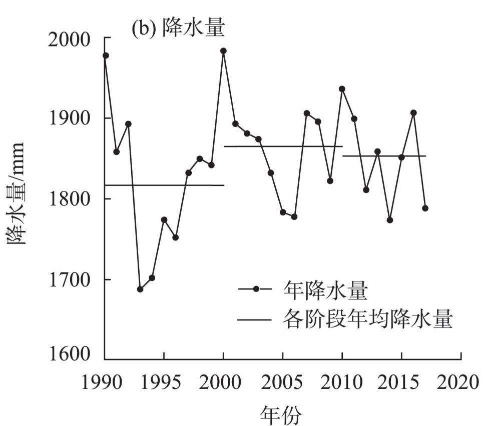


图7 1990—2017年叶如藏布流域气温和降水量变化

Fig. 7 Changes of temperature and precipitation in Yairu Zangbo Basin from 1990 to 2017

势发现，叶如藏布流域的气温整体呈上升趋势。

1990—2017年叶如藏布流域的降水量波动变化较大，整体呈下降趋势(图7b)，研究时段降水量减少了188.53 mm，变化幅度为556.23 mm，减少率为11.09 mm·a^{-1}。1990年起降水量开始下降，下降幅度为-119.13 mm。经过1 a小幅度上涨后，又呈现大幅度下降趋势并且在1993年达到最低值，为1687.68 mm，下降幅度为205.18 mm。此后降水量开始出现上升趋势，于2000年达到最大峰值，为1982.88 mm。2000—2006年降水量呈下降趋势，2006年降水量下降到1778 mm，2006年以后降水量呈现波动变化。取10 a为一个时间段分析，1990—2000年，降水量呈现先减少后增加的趋势；2000—2010年降水量呈现波动变化，整体变化率为4.29 mm·a^{-1}；2010—2017年降水量下降，减小了110.65 mm。

结合上述气温和降水量数据发现：1990—2000年冰川面积退缩13.91 km^2，年均面积变化为0.83%·a^{-1}，该时段气温和降水量平均值为0.5 ℃和1816.77 mm；2000—2010年冰川面积退缩了8.24 km^2，年均变化率为0.54%·a^{-1}。与第一时段相比，气温和降水量均表现上升趋势，气温的升高和降水量的增加分别对冰川消融和积累产生正向作用，使得冰川面积退缩率较前一时段有所减缓，可见降水是该时段冰川变化的主要影响因素；2010—2020年冰川面积退缩了16.74 km^2，年均变化率为1.14%·a^{-1}，相比前10 a大幅增加。在此期间气温大幅上升而降水量波动下降，降水量下降导致积累量减少，但降水量下降幅度较小，可见气温与降水的共同作用导致了冰川面积加速退缩，且气温影响强度大于降水。

对于冰湖而言，结合气温和降水量数据进行分析：1990—2000年冰湖面积出现扩张趋势，共增加0.96 km^2，年均变化率为1.68%·a^{-1}；2000—2010年冰湖面积减小0.63 km^2，年均变化率为0.94%·a^{-1}。与前一时段相比，该时段流域气温和降水量均呈上升趋势，对应时段冰川退缩速率有所减缓，冰川融水对湖泊的补给量减少，可见气温和冰川融水变化是该时段冰湖变化的重要影响因素。2010—2020年研究区内气温上升而降水量下降，该时段冰川加速消融，气温升高导致冰湖的蒸发量增加，降水减少使得冰湖补给减弱，但冰川消融量增加，使得冰湖面积出现增加趋势，可见冰川加速消融是该时段冰湖扩张的主要影响因素。

综上所述，1990—2000年气温的上升与降水量的增加导致冰川面积退缩，冰湖面积扩张；2000—2010年降水是该时段冰川变化的主要影响因素，气温和冰川融水变化是该时段冰湖变化的重要影响因素；2010—2020年气温对冰川的影响作用强于降水对冰川的影响作用，冰川加速消融是该时段冰湖扩张的主要影响因素。

4.2 冰川与冰湖的协同演变特征

从空间位置分布分析，绝大多数冰湖与冰川末端直接相连，其中冰川主要分布于5800~6400 m海拔，约占研究区冰川总面积的63%，冰湖主要分布于5000~5600 m海拔，面积为4.51 km^2。从空间格局上，冰川大面积消融，冰川末端的冰湖受直接影响。

从两者的面积变化趋势分析发现，冰川面积逐年减少的同时，冰湖面积不断增加。2000—2010年该地区气温和降水量均呈上升趋势，使得冰川面积在减少的同时，冰湖面积由2000年6.68 km^{2}到2010年6.05 km^2，缩减了0.63 km^2，年均面积变化率-0.94%·a^{-1}；2010年后，气温上升而降水量出现下降，由于冰川消融，冰湖面积呈上升趋势，可见冰川消融是导致冰湖面积增加的主要因素。

同时，表碛对叶如藏布流域的冰湖也产生了重要影响，与表碛覆盖型冰川相连接的冰湖变化程度较小，变化速率较低，其原因为表碛层抑制了冰川消融，使得以冰川消融为主导因素的冰湖扩张受到了影响，从而降低了冰湖变化的大小与速率。

5 结论

(1) 1990—2020年叶如藏布流域冰川面积呈现退缩趋势，30 a间面积退缩38.88 km^2，近10 a来加速退缩，面积减少16.74 km^2。冰川面积主要分布在5800~6400 m海拔之间，5°~20°坡度分布居多，表碛的覆盖与冰川面积大小均对冰川的数目与面积分布产生影响。

(2) 1990—2020年叶如藏布流域冰湖面积整体呈现扩展趋势，30 a间面积增加3.09 km^2，面积变化率54.02%，近10 a来面积变化显著，冰湖面积扩张2.76 km^2。冰湖分布在5000~5600 m海拔之间居多，0~10°坡度分布居多。表碛覆盖型冰川与非表碛覆盖型冰川对冰湖有着不同程度的影响。

（3）1990—2017年叶如藏布流域气温与降水量波动较大，气温整体上升1.49 ℃，降水量整体下降188.53 mm，促使了叶如藏布流域的冰川消融，冰湖扩张。

参考文献(References)

[1] 秦大河, 效存德, 丁永建, 等. 国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 649-656. [Qin Dahe, Xiao Cunde, Ding Yongjian, et al. Progress on cryospheric studies by international and Chinese communities and perspectives[J]. Journal of Applied Meteorology, 2006, 17(6): 649-656.]

[2] 沈永平, 王国亚. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076. [Shen Yongping, Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report[J]. Journal of Glaciology and Gcocryology, 2013, 35(5): 1068-1076.]

[3] 钟歆玥, 康世昌, 郭万钦, 等. 最近十多年来冰冻圈加速萎缩[J]. 冰川冻土, 2021, 43(6): 1-8. [Zhong Xinyu, Kang Shichang, Guo Wanqin, et al. The rapidly shrinking cryopshere in the past decade: An interpretation of cryospheric changes from IPCC WGI Sixth Assessment Report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(6): 1-8.]

[4] 康尔泗. 中国西北干旱区冰雪水资源和出山径流[M]. 北京: 科学出版社, 2002. [Kang Ersi. Snow and ice water resources and mountain runoff in arid areas of northwest China[M]. Beijing: Science Press, 2002.]

[5] 刘潮海, 康尔泗, 刘时银, 等. 西北干旱区冰川变化及其径流效应研究[J]. 中国科学: 地球科学, 1999(增刊1): 55-62. [Liu Chaohai, Kang Ersi, Liu Shiyin, et al. Study on glacier change and its runoff effect in arid area of northwest China[J]. Science China Earth Sciences, 1999(Suppl. 1): 55-62.]

[6] 上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 玉龙喀什河源区32年来冰川变化遥感监测[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 855-862. [Shangguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Glacier changes at the head of Yurungkax River in the west Kunlun Mountains in the past 32 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6): 855-862.]

[7] 叶庆华, 陈锋, 姚檀栋, 等. 近30年来喜马拉雅山脉西段纳木那尼峰地区冰川变化的遥感监测研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(4): 511-520. [Ye Qinghua, Cheng Feng, Yao Tandong, et al. Tupu of glacier variations in the Mt. Naimona' Nyi region, western Himalayas, in the last three decades[J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(4): 511-520.]

[8] 张强弓. 喜马拉雅冰川消融影响区域生态环境[J]. 自然杂志, 2020, 42(5): 401-406. [Zhang Qianggong. Melting Himalayan glaciers impact the regional eco-environment[J]. Chinese Journal of Nature, 2020, 42(5): 401-406.]

[9] Richter K, Marzeion B, Riva R. The effect of spatial averaging and glacier melt on detecting a forced signal in regional sea level[J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(3): 034004, doi: 10.1088/1748-9326/aa5967.

[10] 宫鹏, 姚晓军, 孙美平, 等. 1967—2014年科西河流域冰湖时空变化[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8422-8432. [Gong Peng, Yao Xiaojun, Sun Meiping, et al. Spatial-temporal variations of glacial lakes in the Koshi River Basin from 1967 to 2014 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8422-8432.]

[11] Banerjee P, Ghose M K, Pradhan R. Identification of essential descriptors in spatial socioeconomic impact assessment modeling: A case study of highway broadening in Sikkim Himalaya[J]. Journal of Geovisualization and Spatial Analysis, 2019, 3(1): 4, doi: 10.1007/s41651-019-0027-0.

[12] Brahmbhatt R M, Bahuguna I M, Rathore B P, et al. Significance of glacio-morphological factors in glacier retreat: A case study of part of Chenab Basin, Himalaya[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(1): 128-141.

[13] Du W J, Liu X, Guo J Y, et al. Analysis of the melting glaciers in southeast Tibet by ALOS-PALSAR data[J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2019, 30(1): 7-19.

[14] 冀琴, 董军, 刘睿, 等. 1990—2015年喜马拉雅山冰川变化的遥感监测及动因分析[J]. 地理科学, 2020, 40(3): 486-496. [Ji Qin, Dong Jun, Liu Rui, et al. Glacier changes in response to climate change in the Himalayas in 1990—2015[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(3): 486-496.]

[15] 蒋亮虹. 基于多源遥感数据的喜马拉雅中段冰川变化监测与分析[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2015. [Jiang Lianghong. Monitoring and analysis of glacier change in the middle Himalaya based on multi-source remote sensing data[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2015.]

[16] 李海, 杨成生, 惠文华, 等. 基于遥感技术的高山极高山区冰川冰湖变化动态监测——以西藏藏南希夏邦玛峰地区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 10-17. [Li Hai, Yang Chengsheng, Hui Wenhua, et al. Changes of glaciers and glacier lakes in alpine and extremelyalpine regions using remote sensing technology: A case study in the Shisha Pangma area of southern Tibet[J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention, 2021, 32(5): 10-17.]

[17] 徐道明, 冯清华. 西藏喜马拉雅山区危险冰湖及其溃决特征[J]. 地理学报, 1989, 56(3): 343-351. [Xu Daoming, Feng Qinghua. Dangerous glacial lakes and their outburst features in the Himalayas of Tibet[J]. Journal of Geography, 1989, 56(3): 343-351.]

[18] 张波, 张瑞, 刘国祥, 等. 基于SAR影像的贡巴冰川末端冰湖年际变化监测及溃决规律分析[J]. 武汉大学学报, 2019, 44(7): 1054-1064. [Zhang Bo, Zhang Rui, Liu Guoxiang, et al. Monitoring of interannual variabilities and outburst regularities analysis of glacial lakes at the end of Gongba glacier utilizing SAR images[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 1054-1064.]

[19] 安国英, 韩磊, 涂杰楠, 等. 中国喜马拉雅山地区冰川1999—

2015年期间动态变化遥感调查[J]. 现代地质, 2019, 33(5): 1086-1097. [An Guoying, Han Lei, Tu Jienan, et al. Remote sensing survey on glacial dynamic evolution in the Himalayas in China during 1999—2015[J]. Geoscience, 2019, 33(5): 1086-1097.]

[20] Romshoo S A, Abdullah T, Bhat M H. Evaluation of the global glacier inventories and assessment of glacier elevation changes over northwestern Himalaya[R]. Germany: Earth System Science Data, 2021.

[21] 王仕哲, 柯长青. 基于ALOS PALSAR的喜马拉雅山冰川流速分布及变化[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(5): 942-955. [Wang Shizhe, Ke Changqing. Distribution and variation of glacier velocity in Himalayas based on ALOS PALSAR[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(5): 942-955.]

[22] 冀琴. 1990—2015年喜马拉雅山冰川变化及其对气候波动的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2018. [Ji Qin. Himalayan glacier change and its response to climate fluctuations from 1990 to 2015 [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.]

[23] 安丽娜. 叶如藏布流域夏季地表水化学与氢氧同位素特征研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2017. [An Li'na. Study on the characteristics of surface water chemistry and hydrogen and oxygen isotopes in Yairu Zangbo Basin in summer[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2017.]

[24] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16. [Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 3-16.]

[25] 冀琴, 刘睿, 杨太保. 1990—2015年喜马拉雅山冰川变化的遥感监测[J]. 地理研究, 2020, 39(10): 2403-2414. [Ji Qin, Liu Rui, Yang Taibao. Glacier variations in the Himalayas during 1990—2015[J]. Geographical Research, 2020, 39(10): 2403-2414.]

[26] 汤远航, 李梦琦, 邓铃, 等. 1990—2020年朋曲流域冰川变化及其对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 27-36. [Tang Yuanhang, Li Mengqi, Deng Ling, et al. Glacier change and its response to climate change in Pumqu Basin in 1990—2020[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 27-36.]

[27] 钟鼎杰, 杨存建. 基于遥感影像的山岳冰川信息计算机解译方法探讨——以梅里雪山为例[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2021, 43(5): 942-952. [Zhong Dingjie, Yang Cunjian. Discussion on computer interpretation method of mountain glacier information based on remote sensing: A case study in Meili Snow Mountain[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2021, 43 (5): 942-952.]

[28] Zhang Qibing, Kang Shichang. Glacier elevation change in the western Qilian Mountains as observed by TerraSAR-X/TanDEM-X images[J]. Geocarto International, 2021, 36(12): 1365-1377.

[29] 廖海军, 刘巧, 钟妍, 等. 1990—2019年贡嘎山地区典型冰川表碛覆盖变化及其空间差异[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2647-2659. [Liao Haijun, Liu Qiao, Zhong Yan, et al. Supraglacial debris-cover change and its spatial heterogeneity in the Mount Gongga, 1990—2019[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2647-2659.]

[30] 阿布都拉·阿不都卡地尔, 董玉森, 务宇宽, 等. 1972—2017年南阿尔泰山中部冰湖变化特征及其对气候变化的响应[J]. 地质科技通报, 2020, 39(4): 94-102. [Abudukadier Abudula, Dong Yusen, Wu Yukuan, et al. Characteristics of glacial lakes in the central part of the southern Altai Mountains from 1972 to 2017 and their responses to climate changes[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(4): 94-102.]

[31] 吴坤鹏, 刘时银, 郭万钦. 1980—2015年南迦巴瓦峰地区冰川变化及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1115-1125. [Wu Kunpeng, Liu Shiyin, Guo Wanqin. Glacier variation and its response to climate change in the Mount Namjagbarwa from 1980 to 2015[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4): 1115-1125.]

Remote sensing monitoring of glacier and glacial lake changes in Yairu Zangbo Basin, Himalayas

DING Yuekai, LIU Rui, ZHANG Cuilan, TONG Liyuan, DONG Jun

(Chongqing Key Laboratory of GIS Application Research, School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: There are many glaciers and glacial lakes in Yairu Zangbo Basin, Tibet, China. Meltwater is an important local resource that contributes significantly to the expansion of glacial lakes. Meanwhile, the outburst of glacial lakes is a potential local natural disaster. Therefore, it is of great significance to analyze and study the glaciers and glacial lakes in this region. Hence, based on the Landsat scene, this study analyzes the distribution and change characteristics of glaciers and glacial lakes in Yairu Zangbo Basin from 1990 to 2020. The results are as follows: (1) Over the past 30 years, the glaciers have shown a shrinking trend. The area shrank from 167.80 km^2 in 1990 to 128.92 km^2 in 2020, with a total area of 38.88 km^2 and an average annual shrinking rate of 0.77%·a^{-1}. Glaciers are mainly distributed between 5800−6400 m and a slope range of 5°−20°. Debris-covered and debris-free glacier areas have an impact on the number and area distribution of glaciers. (2) Contrary to the trend of glacier change, the glacial lakes exhibit an expansion trend, from 5.72 km^2 in 1990 to 8.81 km^2 in 2020, with a total increase of 3.09 km^2 and an average annual growth rate of 1.80%·a^{-1}. (3) Glacial lakes are mainly distributed between 5000−5600 m and a slope range of 0−10°. Debris-covered and debris-free glaciers have different effects on glacial lakes. (4) From 1990 to 2017, temperature and precipitation in this region fluctuated significantly, showing an upward trend in temperature and a downward trend in precipitation, leading to the melting of glaciers and the expansion of glacial lakes. The findings of this study provide detailed basic data on the distribution and change characteristics of glaciers and glacial lakes and provide support for disaster prevention and mitigation in Yairu Zangbo Basin.

Key words: glacier; glacial lake; remote sensing monitoring; Yairu Zangbo Basin